doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.01.01

JWST 时代系外行星大气研究的机遇与挑战

陈紫欣[1,2]，季江徽[1,3]

(1. 中国科学院 紫金山天文台，南京 210033； 2. 中国科学技术大学 天文与空间科学学院，合肥 230026；
3. 中国科学院 行星科学重点实验室，南京 210033)

摘要： 当前已经探测到超过 5 000 颗系外行星，系外行星领域正在从搜寻普查进入到精细表征阶段。过去 20 年通过对大约 100 颗系外行星大气表征，初步建立了对凌星行星和直接成像行星的大气探测方法和一系列大气光谱正向建模、反演方法与大气理论的基本框架。詹姆斯 · 韦布空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST) 具有前所未有的近红外到中红外光谱探测能力，高质量数据将带动大气理论与模型的跨越性发展。第一轮观测的科学产出展现了 JWST 对凌星行星和直接成像行星的大气表征能力以及对宜居带行星大气的初步限制。JWST 时代的系外行星大气精细研究已初露峥嵘，与未来 5 年内即将建成的具有大气普查能力的 ARIEL 和大口径自适应光学地基望远镜相联合，将在更深的层次上揭示系外行星大气的多样性。

关 键 词： 系外行星；行星大气；天基观测；光谱观测

中图分类号： P185 **文献标识码：** A

1 引 言

1995 年，Mayor 和 Queloz[1]发现了第一颗围绕类太阳恒星运转的系外行星飞马座 51b，拉开了系外行星探索黄金时代的序幕[2]，两人也因此被授予 2019 年度诺贝尔物理学奖。随着越来越多地面和空间系外行星搜寻项目的启动，截至 2023 年 4 月，已经发现的系外行星超过 5 000 颗，系外行星逐渐成为天文学研究的热点领域。然而，自 2002 年首次探测到系外行星大气[3]，天文学家只对百余颗行星进行过光谱观测和大气表征。

收稿日期： 2023-04-21； **修回日期：** 2023-05-15

资助项目： 国家自然科学基金 (12033010, 11773081)；中国科学院 B 类先导专项 (XDB41000000)；紫金山天文台小行星基金会资助

通讯作者： 季江徽，jijh@pmo.ac.cn

在这个数量上，现有的系外行星大气样本是不完备的，偏差来自两个方面：目前发现行星类型的不完备性和大气表征方法的选择性。后者在根本上继承了行星搜寻方法的探测能力限制，因为行星大气的探测方法与发现行星的探测方法有着密切的联系。图 1 展示了不同方法发现的系外行星的轨道周期和行星质量分布情况，深紫色圆圈标记了进行过大气表征的行星。目前进行过大气表征的行星主要通过凌星法和直接成像法发现。传统的系外行星大气探测手段也可以据此分为两类：对凌星系统探测和对直接成像行星的探测，这两类探测也是 JWST 进行系外行星大气研究的两种手段。

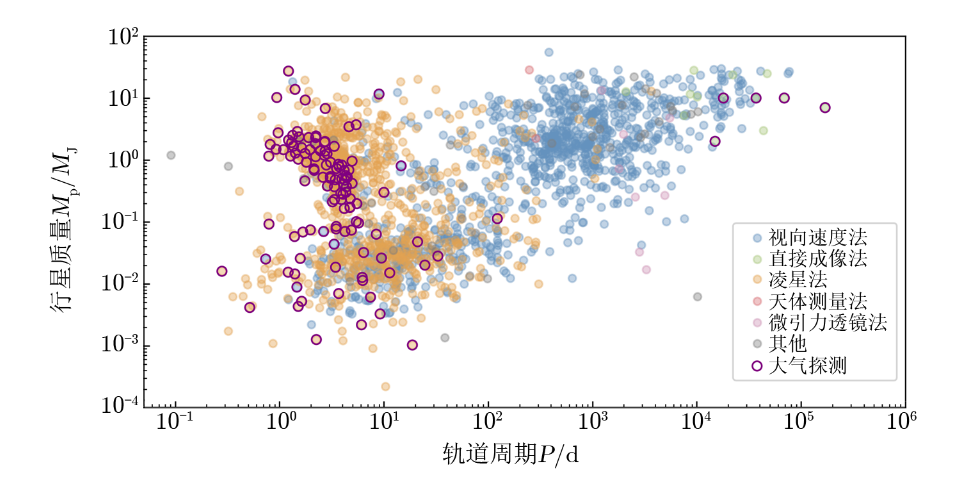


图 1　不同探测方法发现的系外行星周期-质量分布

凌星行星的特点是行星围绕恒星的公转轨道面与观测方向几乎平行，当行星运动到恒星与观测者之间时，遮挡恒星光线造成的光度下降即凌星深度为 $D=(R_p/R_s)^2$，其中，R_p 为行星半径、R_s 为恒星半径。另外凌星概率 P_{tr} 还受轨道半长径 a 的约束，$P_{tr}\approx R_s/a$，因此凌星法倾向于探测到周期短、半径大的热木星。

对于凌星事件的光变信号进一步研究，不同波长上的凌星深度反映了可能存在的大气特征。这是因为行星大气不是完全透明的，大气中的成分对恒星不同波长光子的吸收能力存在差异，因此凌星时造成的光度下降是波长的函数。将非凌时的恒星光谱与在凌时的光谱进行比较，就能得到行星大气在不同波长上对恒星辐射的吸收，即透射光谱。大气厚度影响透射光谱的信号辐射强度，一般用大气标高 $H=\dfrac{k_BT}{mg}$ 度量，k_B 为玻尔兹曼常数，T、m、g 分别是行星的平衡温度、大气平均分子质量和表面重力。因此更容易通过透射谱推断温度高、大气平均分子质量更小 (H 或 He 主导) 的热木星大气特征。目前凌星透射光谱在大气表征，特别是大气化学组成方面是最成功、最有效的。目前已经对百余颗行星进行了凌星透射谱的观测，发现拥有高精度多波段的光谱数据的行星超过 20 颗[4]。

透射光谱能提供大气的吸收特征，对于凌星系统，还可以通过次掩和相位曲线获得行星表面的发射信息。根据黑体辐射定律，行星-恒星在红外波段的对比度比紫外和光学波段更强。而行星-恒星在特定观测频率 ν 处的红外热辐射比还与它们在该频率处的亮温度比、半

径比相关，$\frac{F_{\rm p}(\nu)}{F_{\rm s}(\nu)} = \left[\frac{T_{\rm p}(\nu)}{T_{\rm s}(\nu)}\right]\left(\frac{R_{\rm p}}{R_{\rm s}}\right)^2$。冷暗恒星周围的大质量热巨行星有相对更大的亮温度比与半径比，它们的次掩发射光谱和相位曲线有更强的信号值。

与凌星的原理非常相似，当行星运动到恒星背后，恒星遮挡了行星表面的发射与反射光，光变曲线会出现光度下降的信号，与凌星时的凌食 (又称主掩) 区分，一般称次食或次掩。由于恒星与行星发射光谱有较高的对比度，典型次掩信号比凌星信号小 $1 \sim 2$ 个量级。在这个过程中，将恒星遮挡行星前后的光谱进行比较，能得到行星朝着主星一面 (日面) 的发射光谱，可以提供行星日面的温度信息，检测可能存在的大气化学成分。

人们利用相位曲线，测量恒星-行星系统的发射通量在更长时间基线上随行星轨道相位变化的趋势。这种方法对潮汐锁定的热木星大气的温度分布有重要的限制作用。

随着地基望远镜高稳定高分辨率光谱仪的升级，目前高分辨多普勒光谱成为具有大气研究潜力的新手段[6]。这一方法的原理与搜寻行星的视向速度法属于一体两面的关系。视向速度法是利用恒星与行星的引力作用，测量恒星绕质心的运动在视线方向造成的多普勒效应。恒星视向速度振幅 $K_{\rm p} = v\sin i$。然而，在这个绕转的过程中，典型热木星的视向运动速度比恒星快 1×10^3 倍左右，行星光谱在混合光谱中有周期性大幅度的多普勒频移。依托地面大口径望远镜上的高分辨率光谱仪器，可以提取行星本征的发射线信号。另外，在视向速度法中，幅值虽然受到轨道倾角 $\sin i$ 形式的调制，却不像凌星法那样严格要求行星的轨道面与观测方向对齐，即高分辨率多普勒光谱也可以对非凌系统的行星大气进行研究，进一步扩大了系外行星大气的研究样本。

直接成像法搜寻的系外行星在当前行星版图中“离群索居”，提供了独特的宽轨道间距行星样本。目前通过直接成像法探测到行星约 20 颗。对直接成像系外行星而言，最大的挑战是内工作角限制和高对比度成像的需求。因此这一类方法更容易探测主星比较暗弱，行星距离主星较远以及行星本身比较年轻的系统。

从行星类型的样本分布而言，系外行星的大气探测与系外行星搜寻具有相似性。对凌星热木星研究最深入，而直接成像行星群体则相对独立。随着探测能力的提升，探测对象逐渐扩大到质量更小、温度更冷的类海行星、超级地球，最终实现对类地行星大气的探测。在代表性热木星的研究中也证实，多种探测手段、多波段、多相位的协同使用，使得对遥远系外行星的大气性质实现更精细、更准确的刻画，比如从一维到三维的大气结构，从大气主要成分或单一的特征分子的定性测量到元素丰度的定量限制，从周期平均到具有时变特征和相位差异的描述。

在 2021 年 12 月 25 日发射的詹姆斯 • 韦布空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST) 是人类迄今为止制造的最大的空间望远镜。作为跨时代的空间望远镜，行星系统和生命起源是它的六大科学目标之一。JWST 以直径 6.5 m 的口径，低至 35 K 的工作温度在地日拉格朗日 L2 点长期稳定观测，有能力对更大参数空间的系外行星大气进行研究，同时也将实现对一系列已知行星的更精准大气刻画。如凭借着史无前例的高分辨高信噪比红外光谱能力，韦伯将“看到”小至地球质量行星的大气以及近红外到中红外波段上更丰富的分子吸收特征，告诉我们更多关于太阳系外行星的大气，甚至找到太阳系外生命的基石。

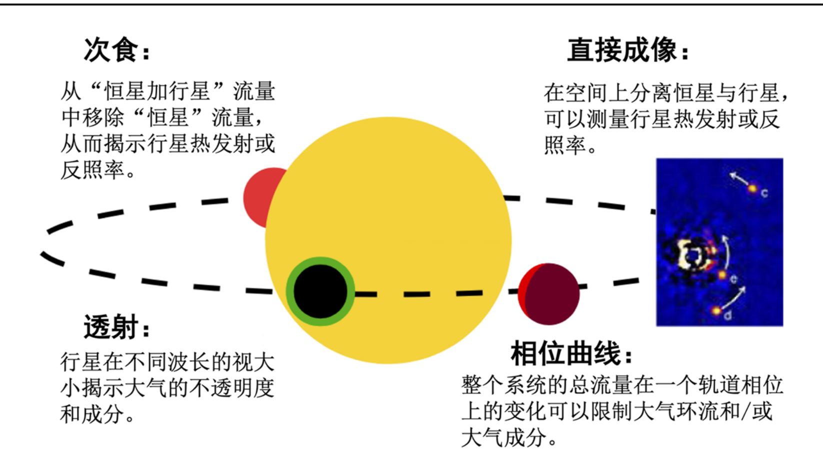


图 2 系外行星大气探测方法示意图[5]

本文第 2 章主要介绍 JWST 发射前系外行星大气的研究历史与进展；第 3 章介绍 JWST 对系外行星大气的探测能力；第 4 章讨论 JWST 时代系外行星大气的理论、模型和方法的挑战与革新；第 5 章介绍 JWST 发射以来第一轮 (Cycle 1) 观测发布的科学成果；最后对全文进行总结并展望未来的探测计划。

2 JWST 前时代的系外行星大气领域

2.1 大气探测历史

JWST 发射前的系外行星大气探测可以根据用于系外行星研究仪器的能力和特性划分为两个阶段。哈勃空间望远镜 (Hubble Space Telescope, HST) 和斯皮策太空望远镜 (Spitzer Telescope) 是 JWST 之前的两大天基系外行星大气探测仪器。

21 世纪的第一个 10 年，早期测光和稀疏的数据来自 HST 的 NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer)、STIS (Space Telescope Imaging Spectrograph) 和 Spitzer 测光仪器，由于观测的选择效应，大气研究对象都是凌星行星，许多突破性研究主要围绕 HD 189733 b 和 HD 209458 b 两颗典型热木星进行[7–9]。对系外行星大气的探测最先在行星的凌星相位上实现。2002 年，具有可见光波段光谱能力的 HST/STIS 在 HD 209458 b 上的透射谱中探测到钠原子特征线[3]。这是首次在实测意义上实现对太阳系外行星大气的探测证据。同时期天文学家使用 STIS 在 UV 波段探测到 HD 209458 b 凌星时对恒星莱曼 α 线 $(15 \pm 4)\%$ 的吸收[10]。红外波段的行星-恒星对比度比可见光和 UV 波段更大，但对典型热木星依旧需要约 10^{-4} 的量级。对系外行星大气的红外波段凌星测量最早是通过 Spitzer 和 HST 的 NICMOS 仪器实现的[7, 8]。由于这一阶段的探测仪器并不是专门为系外行星研究设计，测光精度限制了这一阶段的大气探测水平 (1σ)。同样是对凌星系统，次掩相位的几何关系也为有限仪器限制下的大气探测提供了有效途径。如前所述，次掩光变信号比凌星弱，需要在红外波段观测，Spitzer[11] 的宽带光度测量是主要工具。Spitzer 的红外摄谱仪

(IRS) 在 16 μm处观测到 HD 189733 b 显著的次掩食信号 (32σ)[12]。Knuston 等人[13]利用 Spitzer 红外阵列相机 (Infrared Array Camera, IRAC) 的 8 μm 通道测量 HD 189733 b 在主掩与次掩之间不同相位的光度变化，绘制了第一张系外行星大气的二维温度分布图。围绕两颗典型的凌星热木星 HD 189733 b 和 HD 209458 b，系外行星大气学者进行了许多先导性的观测和理论研究。这 10 年中，极尽天基探测器能力对凌星行星进行观测研究，初步实现对凌星热木星的分子光谱特征探测，昼夜温度梯度和垂直大气结构的限制[14]。

地基望远镜对系外行星的直接成像探测也在这一时期开启。2004 年，欧洲甚大望远镜 (Very Large Telescope, VLT) 首次实现对系外行星的直接成像，并获得了对 2M1207 b 的红外成像和光谱观测[15]。2008 年凯克 (Keck) 天文台通过高对比度观测，发现了围绕主序恒星 HR 8799 的多行星系统[16]。

在第二个 10 年中，陆续出现专门用于系外行星科学的空间任务，如开普勒太空望远镜 (Kepler Space Mission)[17]及其后续任务 K2 (Kepler's Second Mission)[18]、TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)[19]、CHEOPS (Characterising Exoplanet Satellite)[20]。但它们更专注于使用凌星法搜寻更多的系外行星 (候选体) 或更精确测定行星的轨道与物理参数，因而没有配备用于系外行星大气研究的光谱仪。

2009 年 Spitzer 的冷却剂耗尽，转入“温暖”任务阶段，仅剩红外阵列相机中的 3.6 μm 和 4.5 μm 探测器阵列能继续使用。但幸运的是，在这一年 HST 的 WFC3 (Wide Field Camera 3) 被启用，和 Spitzer 的两个宽带测光共同支撑起系外行星大气天基探测的门庭。当前使用 WFC3 对系外行星大气中 H_2O 吸收带的探测已经是例行的流程，天文学家也已经发现水在系外行星大气中并不稀缺。然而 WFC3 仪器的低分辨率和相对狭窄的波长覆盖范围 ($1.1 \sim 1.4$ μm)，不能稳定地检测到 H_2O 以外的其他大气分子。在部分行星上，在空间以低分辨率探测到碱金属线 Na 和 K 的吸收线[21]。

得益于地基望远镜对高精度视向速度的追求，光谱探测的分辨率有飞跃性提高。早期 ESO 3.6 m 望远镜的 HARPS (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher)、VLT 的 UVES (Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph) 和 CRIRES (Cryogenic High-resolution Infrared Echelle Spectrograph)、Subaru 的 HDS (High Dispersion Spectrograph)、Keck 的 HIRES (High Resolution Echelle Spectrometer)、伽利略国家望远镜 (Galileo National Telescope，意大利语简称 TNG) 的 HARPS-N。近年升级的仪器还有 VLT 的 ESPRESSO (Echelle Spectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations)、CRIRES+、Gemini-N 北双子望远镜的 MAROON-X 光谱仪提供了高分辨率的光谱数据。随着仪器分辨率的提升，高分辨率光谱学 ($R = 25\,000 \sim 100\,000$) 在系外行星大气中的作用也逐渐凸显。Snellen 等人[22]使用 CRIRES 观测了热木星 HD 209458 b，在高分辨率时序光谱中分离出行星的多普勒频移，首次对系外行星大气中的分子 (CO) 进行了可靠的检测。目前高分辨率光谱普遍被用来研究凌星和非凌星热巨星的大气成分，并且能进一步提供亚海王星[23]和超级地球[24]大气的一些限制。

除此之外，对于直接成像行星，随着高对比度成像技术的进一步发展，大约 20 颗宽轨道间距 ($10 \sim 100$ AU) 的大质量行星 (或行星质量天体) 通过直接成像手段进行表征。在这

些行星大气中，H_2O 和 CO_2 也比较常见，个别行星还可能含有 CH_4。图 3 列举了目前不同类型行星中大气化学成分的探测结果。

	Planet name	Properties T_{eq}/ T_{eff}(K)	M (M_{jup})	Bulk H	He	Ices H_2O	CO	CH_4	CO_2	HCN	Alkalis Na	K	Li	Rocks Fe	Mg	Ca	V	Cr
Transitting planets	KELT-9b	4 048	2.88	H										H	H	H		
	WASP-33b	2 781	2.1	H		L	L							H		H		
	WASP-189b	2 641	1.99											H	L		L	L
	WASP-121b	2 359	1.18	H		M					H	H	L	H	H	H	L	L
	KELT-20b	2 255	3.38	H		L					H			H	L	H		
	WASP-76b	2 182	0.92			L					H		L	H	L	H		
	HAT-P-32b	1 801	0.58	L	L	L												
	WASP-77Ab	1 741	2.29			H	L											
	WASP-17b	1 698	0.78			L					L							
	HD209458b	1 476	0.73	L	L	H	H	L		L	C				C			
	WASP-127b	1 401	0.18			L					H	L	L					
	XO-2b	1 327	0.566								L	L						
	HAT-P-1b	1 322	0.525			L					L							
	WASP-52b	1 299	0.46	L		L					H	L						
	WASP-96b	1 286	0.48			L					L							
	HD189733b	1 192	1.13		H	H	H			L	H	L						
	WASP-39b	1 120	0.28			L			L		L							
	WASP-6b	1 093	0.37			L					H	H						
	WASP-69b	988	0.29		L	L					H							
	HAT-P-12b	957	0.21			L					L							
	HAT-P-18b	848	0.20		L	L												
	HAT-P-11b	829	0.084		M	L												
	WASP-107b	739	0.12		H	L												
	GJ436b	686	0.0728	L														
	GJ3470b	604	0.043		L	L												
Non transiting	Tau Bootis b	1 636	5.84			C	H											
	HD179949b	1 552	0.92			M	L											
	51Peg b	1 260	0.46			H	L											
	HD102195b	1 053	0.46			L		L										
Directly imaged	CQ Lupi b	~2 650	25			L	L											
	Beta Pictoris b	~1 724	12.9			H	H											
	TZC 8998-760-1b	~1 700	14			L	L											
	HR8799c	~1 100	8.1			H	H	C										
	HR8799b	~900	5.84			L	L	C										
	51 Eridiani b	~760	9.1			H		H										

Confidence level :
High observed by at least 2 instruments
Medium : observed by one instrument multiple times
Low : observed once by one instrument
Controversial

Only planets with at least two different species detected. Photometric only detection are discarded. Additionnal rocks detections (Ti, Sc, Si), ionic species, together with all references are in the full table in the appendix in Guillot et al. 2022

注：绿色表示至少两种仪器都测到相关信号，黄色标志一种仪器多次测量到大气成分的特征吸收，红色表示行星上该成分的探测结果尚有争议。

图 3 3 类行星的大气化学组成探测情况[25]

在此场景下，在空间的系外行星大气探测能力亟需提高，而 JWST 的发射无疑是当前系外行星探测版图中关键的一块。

2.2 研究方法和模型发展

在前 20 年的发展中，行星大气领域已基本建立起一套基于探测能力的理论模型与研究方法。基于大气本身的物理化学性质的研究，对观测的解释可以使用正向自洽模型以及反演方法[4]，各方面综述皆备述。一维的正向自洽模型一般在平面平行的几何结构中假设大气的元素组成和平衡条件 (热化学平衡和辐射对流平衡)。热化学平衡假设可以根据元素丰度计算化学丰度 (即原子或分子丰度)；辐射对流平衡的假设可以计算与化学丰度自洽的温度压力 ($P-T$) 曲线。辐射对流平衡的假设对系外行星热发射光谱非常重要，因为大气温度梯度对发射谱中的光谱特征形成有关键作用。通过得到的化学成分以及 $P-T$ 结构可以计算大气层的辐射传输，最终得到光谱。三维大气环流模型是通过给定行星体参数和辐射场计算得到大气完整的三维结构。通用环流模型 (general circulation model, GCM) 中涵盖大气的化学、热、动力和辐射特性[26–28]。经典的反演方法由参数化的正向模型与参数估计算法耦合，从而估计给定光谱数据集的模型参数。模型中的自由参数包括在观测光谱带通中具有显著特征的化学组成、温度分布和宏观云参数 (大气中的位置、空间范围和不透明度)，以及与观测光谱相关的任何其他自由参数[29, 30]。目前，理论模型的发展更多关注偏离平衡状态下的大气，如化学不平衡[31]、大气逃逸等[32, 33]。

3 JWST 的系外行星大气探测能力

地基高分辨率仪器对系外行星大气的探测取得令人振奋的结果，但考虑到地球大气在红外波段的强烈吸收，天基仪器的高信噪比探测仍无可取代。JWST 的出现将极大地扩大现有天基大气探测的波长覆盖范围和提高光谱探测分辨率。

JWST 搭载的 4 个科学仪器中，近红外相机 (NIRCam)、近红外光谱仪 (NIRSpce) 和近红外成像与无缝光谱仪 (NIRISS) 布局在近红外波段 (0.6 ∼ 5.3 μm)，完全覆盖并衔接了 HST/WFC3 和 Spitzer/IRAC 的工作波长范围，还与 HST/STIS 仪器在可见光有部分重叠，涵盖碱金属 Na、K 的吸收线。而中红外仪器 (MIRI) 从 5 μm 一直延续到 28 μm的波长覆盖范围，将首次揭开系外行星大气在中红外的光谱细节。图 4 展示了 JWST 的 NIRSpec 仪器与 HST/STIS、WFC3 以及 Spitzer/IRAC 的光谱能力对比。在图 4a) 中彩色数据点是 JWST 以前天基仪器对热木星大气探测的观测数据，彩色曲线是对应的最佳拟合光谱。灰色数据点是模拟 JWST/NIRSpec 对 WASP-17b 的观测结果。JWST 的观测数据将密集地填充 WFC3 与 Spitzer/IRAC 之间的空隙，精确地捕捉到近红外到中红外的大气特征。图 4b) 显示，与 WFC3 相比，JWST 将为大气研究所需要的重要参数如大气金属丰度、C/O 比等提高至少一个量级的限制[34]。

凌星科学是 JWST 的重要科学课题，透射光谱、次掩光谱 (或发射光谱) 对 JWST 的光谱仪有很高的要求。如图 5 所示，JWST 的 4 个科学仪器都具备光谱能力。表 1 总结了

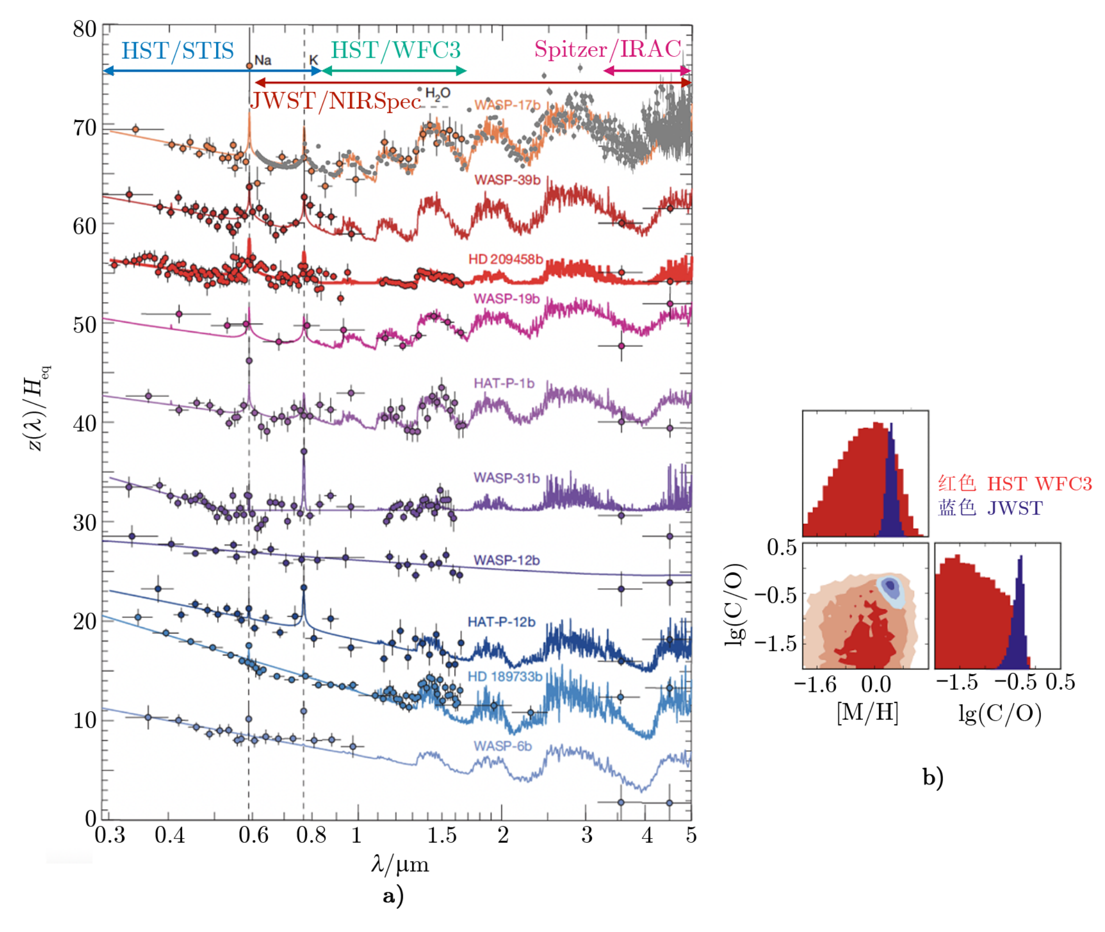


图 4 JWST 与 HST、Spitzer 对系外巨行星透射谱数据及大气限制的对比[25, 35]

各仪器的光谱仪参数。根据目标系统的特点选取不同仪器的不同观测模式和滤光片研究，可以最大化利用 JWST 强劲的集光能力与平台的稳定性。下面逐一介绍各仪器的特点与探测能力。

JWST 近红外成像仪 (NIRCam) 利用二向分束器在短波通道 (0.6 ~ 2.3 μm) 和长波通道 (2.4 ~ 5.0 μm) 下对同一视场进行观测，如图 5 所示。光栅在长波通道搭配两个宽带滤光片工作，可以得到 $\lambda = 2.4 \sim 4.0$ μm 或 $\lambda = 3.8 \sim 5.0$ μm 范围内分辨率 $R \approx 1\,600$ μm 的无缝光谱。快速读出子阵列保证了 NIRCam 可以对 $K \approx 4$ mag 或者更亮的恒星进行光谱观测。与此同时，短波通道使用散焦透镜辅助还能对 $K \approx 6$ mag 的目标进行光度测量。在缺少 HST 的快速扫描模式下，NIRCam 也能达到 WFC3 G141 相似的测光精度 (约 3.5×10^{-5})[36]。

JWST 近红外成像和无缝摄谱仪 (NIRISS) 中的单目标无缝光谱 (SOSS) 模式是专门为凌星光谱设计，针对时序观测进行了优化。这一模式利用交叉色散的光栅获得 0.6 ~ 2.5 μm 的波长覆盖，分辨率 $R \approx 700$。柱面透镜在空间方向上将光谱加宽到 20 ~ 25 pixel，从而允

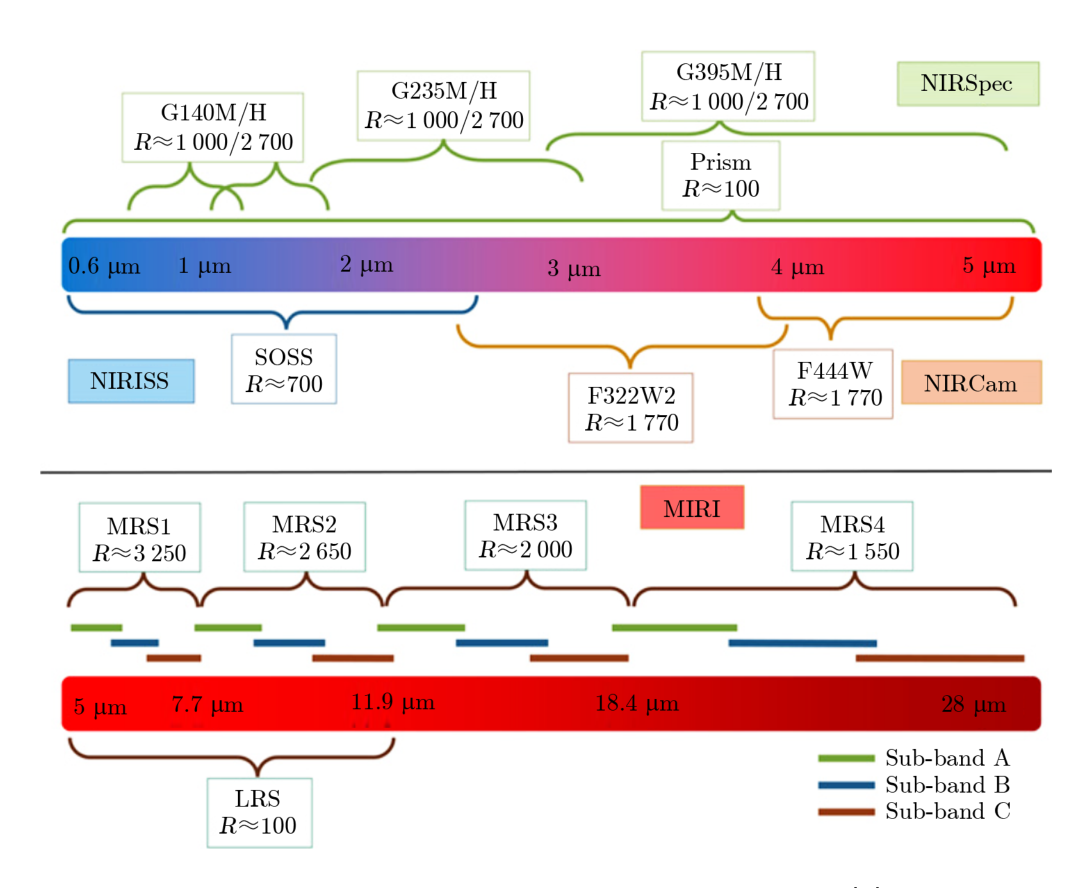


图 5　JWST 各仪器的光谱仪观测模式的覆盖波段与分辨率[35]

表 1　JWST 各仪器的光谱仪能力

仪器模式	观测模式	滤光片	波长 λ /μm	分辨率 R
NIRCam	GRISM	LW/F332W2	2.4 ~ 4.1	1 600 (4 μm 处)
		LW/F444W	3.8 ~ 5.0	
NIRISS	SOSS	CLEAR/PRISM	0.6 ~ 2.5	700
MIRI	LRS	/	5.0 ~ 12	100
	MRS	IFU	5.0 ~ 28.3	1 300 ~ 3 700
NIRSpec	FSS&BOTS	PRISM	0.6 ~ 5.3	100
		F070LP	0.7 ~ 1.2	1 000 (MRS)
		F100LP	1.0 ~ 1.8	2 700 (HRS)
		F170LP	1.7 ~ 3.1	
		F290LP	2.9 ~ 5.2	

许更长的积分时间并减少检测器响应中像素级差异的影响，最终能够观测到亮度 $J \approx 7$ mag 的目标。另外 NIRISS 可以使用 NIRCam 的滤光片子集，原则上可以用于 0.8 ~ 5.0 μm 的直接成像[36]。

JWST 的近红外光谱仪 (NIRSpec) 是获取系外行星光谱的利器，是一款设计用于多目标光谱和高对比度、高通量单目标光谱学的高通用光谱仪。系外行星凌星科学主要使用 NIRSpec 的固定狭缝高对比度单目标光谱 (FSS) 模式与宽孔径高通量亮星时序光谱 (BOTS) 模式。值得注意的是该仪器中 $1.6'' \times 1.6''$ 的宽孔径是专门为在 BOTS 模式下的凌星光谱设计的，是唯一一个支持曝光时间超过 1×10^4 s 时序观测的缝隙。因而测量明亮恒星的凌星光谱、次掩光谱以及相位曲线，是 NIRSpec 的一大重点任务。它可以在 4 个稍窄波长区域 (0.7 ~ 1.2, 1.0 ~ 1.8, 1.7 ~ 3.1, 2.9 ~ 5.2 μm) 获取凌星行星的中 ($R = 1\,000$) 或高分辨率 ($R = 2\,700$) 光谱。对于较暗的源 ($J < 10$ mag)，还可以使用低分辨率 ($R = 100$) 的棱镜模式直接获取 $\lambda = 0.6 \sim 5.0$ μm 的光谱。

JWST 的中红外仪器 (MIRI) 提供了宝贵的中红外光谱能力。低分辨率光谱仪 (LRS, R=100) 通过复合棱镜获得 $\lambda = 5.0 \sim 12$ μm 的无缝光谱。中分辨光谱仪 (MRS, $R = 1\,300 \sim 3\,700$) 则是通过 4 个积分视场单元 (5.0 ~ 7.7, 7.7 ~ 11.9, 11.9 ~ 18.4, 18.4 ~ 28.3) 交错覆盖得到积分视场光谱。该仪器中的中红外仪器成像模块 (MIRIM)，通过使用 10 个可选宽带滤波片从而提供中心波长为 5.6 ~ 25.5 μm，带宽范围为 $\Delta\lambda = 0.7 \sim 4.0$ μm 的光度测量。

JWST 的仪器能力给予科学家极大信心，在未来对系外巨行星大气成分做出进一步的限制。如图 6 所示，黑色尖双箭头直线标注了 JWST 的所有光谱仪器模式及其波长覆盖范围，彩色曲线是行星大气中的重要分子在可见光-红外波段的吸收截面[4]。

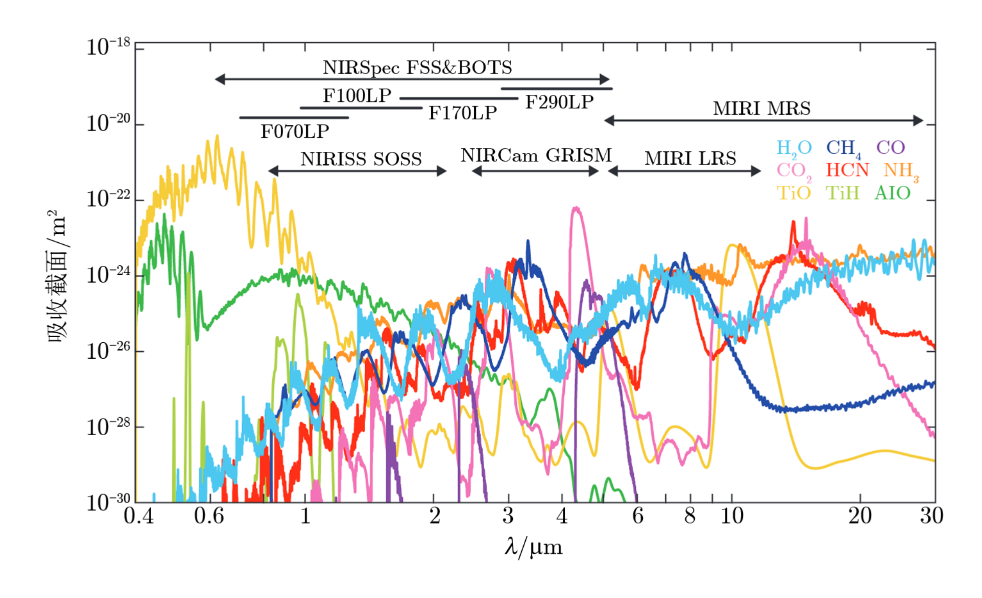


图 6 JWST 的所有光谱仪器模式及其波长覆盖范围和可见光-中红外常见大气分子的吸收截面[4]

JWST 第一轮所有科学观测 (ERS、GTO、GO) 项目中，将完成对 54 个系统共计 68

颗行星的凌星科学观测。图 7 展示这些系统的距离与宿主恒星类型的分布。主星类型包括 A、F、G、K、M 型星以及白矮星 (WD 1856+543)。JWST 观测的行星系统数目随主星有效温度增加而降低，第一轮计划观测的行星中，围绕 M 矮星运行的有 27 颗，围绕 F、G、K 型星运行的有 39 颗。观测目标系统的距离随主星有效温度升高而增大，即对太阳系近邻 (小于 20 pc) JWST 重点观测 M 矮星系统中的凌星事件 (见表 2)。

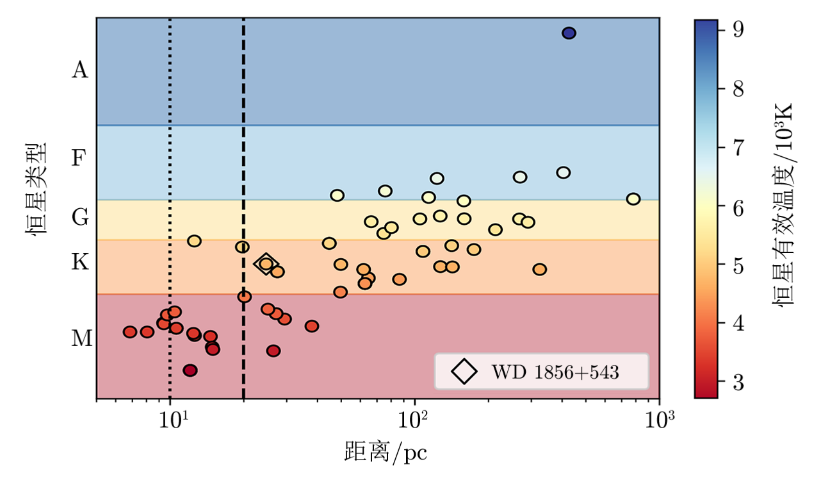


图 7　JWST 第一轮观测凌星系统的宿主恒星分布情况

图 8 展示这些行星的类型与轨道半径-平衡温度分布。行星类型根据行星的半径和平衡温度划分。JWST 观测的行星类型主要集中在两个区域——温暖的、0.7 ~ 3 $R_{\oplus}$ 大小的“小”行星以及热木星。以太阳系行星为参照，JWST 已经能够对与地球相似的行星 (半径、平衡温度) 进行观测，并且其中相当一部分在距离太阳系 20 pc 的范围内。然而图 7 显示，这些行星大部分都围绕 M 矮星而非类太阳的恒星运行。M 矮星的活动性对这些行星的演化以及大气状况有重要影响，可能使其有别于太阳系内类地行星。JWST 对它们的观测有望加深对 M 矮星系统中类地行星形成与演化的了解。另外，JWST 还将观测 23 颗超级地球 ($1.2\,R_{\oplus} < R_{\rm p} < 2\,R_{\oplus}$) 和亚海王星 ($2\,R_{\oplus} < R_{\rm p} < 3\,R_{\oplus}$)——两种太阳系中不存在的行星类型。而在目前探测的系外行星样本中，行星半径呈现双峰结构，在 $(1.5 \sim 2)\,R_{\oplus}$ 范围内分布较少[37, 38]。光致蒸发理论预言了这一分布低谷的存在[39]，核光度冷却理论[40, 41]也可以解释这一现象。利用 JWST 对这一范围内行星大气的探测，人们可以对此进行更深入的研究，以补充对行星形成和演化过程的理解。在 JWST 计划观测的行星半径-行星平衡温度的参数空间中，太阳系木星仍旧孤独，唯一一颗冷木星目标是围绕白矮星旋转的 WD 1856+534 b，其次最冷的类木行星是 783 pc 外 381 K 的 Kepler-51 d。

JWST 对系外行星大气探测的目标不止步于凌星系统，直接成像行星与原行星盘是系外行星科学的另一重要课题。因为地球大气层对中红外的吸收，导致在 JWST 之前所有的直接观测都是在近红外获得的。MIRI 仪器有超过 5 μm 的光谱探测能力，因此 JWST 有望成为直接成像系外行星大气层特征的游戏规则改变者[42]。MIRI 仪器的工作波段范围对应行星发射大部分辐射通量，恒星与行星亮度比也更小，能够展示出行星大气层的清晰分

表 2 JWST 第一轮观测中距太阳系 20 pc 内的目标行星系统

行星	行星类型	观测事件	观测仪器	主星类型	距离/pc
55 Cnc e	热超级地球	次掩	NIRCam、MIRI	G	12.59
GJ 1132 b	暖类地行星	次掩、凌星	MIRI、NIRSpec	M	12.61
GJ 1214 b	暖亚海王星	凌星、相位曲线	NIRCam、MIRI	M	14.64
GJ 357 b	暖超级地球	凌星	NIRISS、NIRSpec	M	9.44
GJ 367 b	热类地行星	凌星	MIRI	M	9.41
GJ 436 b	暖海王星	次掩	MIRI、NIRCam	M	9.75
GJ 486 b	暖超级地球	次掩、凌星	MIRI、NIRSpec	M	8.07
HD 189733 b	热木星	次掩、凌星	NIRCam、MIRI	K	19.76
L 98-59 c	暖超级地球	凌星	NIRISS、NIRSpec	M	10.62
L 98-59 d	暖超级地球	凌星	NIRISS、NIRSpec	M	10.62
LHS 1140 b	温超级地球	凌星	NIRSpec	M	14.99
LHS 3844 b	热超级地球	次掩	MIRI	M	14.88
LHS 475 b	暖类地行星	凌星	NIRSpec	M	12.48
LTT 1445 A b	暖超级地球	凌星、次掩	NIRSpec、MIRI	M	6.87
TOI-741.01	暖类地行星	凌星	NIRCam	M	10.45
TRAPPIST-1 b	暖类地行星	次掩、凌星	MIRI、NIRISS	M	12.10
TRAPPIST-1 c	温类地行星	次掩、凌星	MIRI、NIRSpec、NIRISS	M	12.10
TRAPPIST-1 d	温类地行星	凌星	NIRSpec	M	12.10
TRAPPIST-1 e	温类地行星	凌星	NIRSpec	M	12.10
TRAPPIST-1 f	冷类地行星	凌星	NIRISS	M	12.10
TRAPPIST-1 g	冷类地行星	凌星	NIRSpec	M	12.10
TRAPPIST-1 h	冷类地行星	凌星	NIRSpec	M	12.10

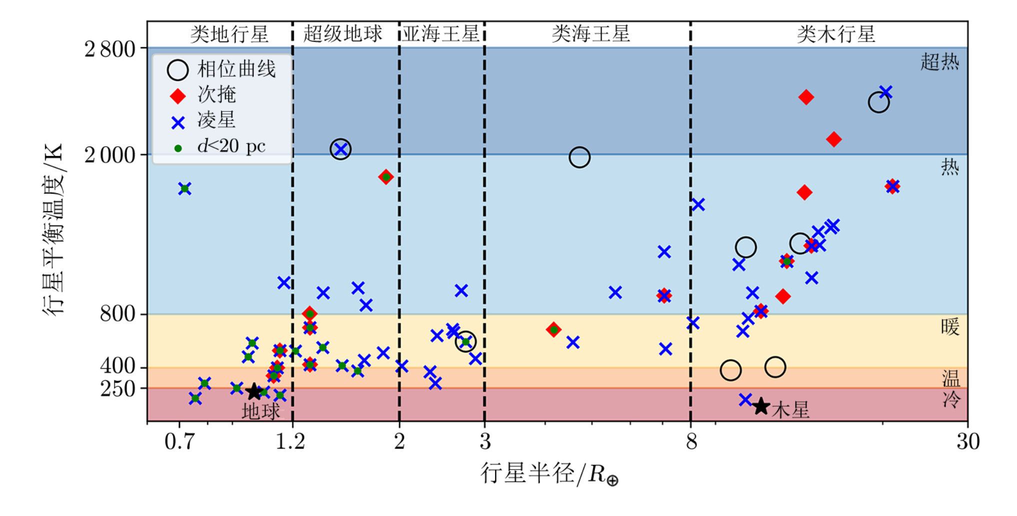


图 8 JWST 第一轮观测中凌星系统的行星分布情况

子特征。如引言所述，探测直接成像行星及其大气最大的挑战是高对比度成像与内工作角的限制。当前在 JWST 中使用了两种方法实现高对比度成像：NIRCam 与 MIRI 的星冕仪成像和 NIRISS 的孔径屏蔽干涉测量 (AMI)。值得注意的是，MIRI 中的四象限星冕仪 (4QPM) 是这类仪器在空间探测中的首秀。与传统的 Lyot 掩膜相比，它拥有更小的内工作角 ($IWA \approx \lambda/D$)。MIRI 中的 3 个 4QMP 中心波长分别在 $\lambda = 10.575$, 11.3, 15.5 μm，其中 MASK1065 掩膜 ($\lambda = 10.575$ μm) 对应 NH_3 的一个特征吸收带，与其相邻的 MASK1140 掩膜 ($\lambda = 11.3$ μm) 联合起来将对直接成像行星大气中的 NH_3 丰度构成强有力的限制，进而区分大气中化学平衡与非平衡的状态。

JWST 的星冕仪还不具备光谱能力，具有光谱能力的星载星冕仪预计在下一代罗曼空间望远镜上实现。但 NIRSpec 和 MIRI 上的积分视场单元可以获得恒星-行星 (或亚恒星天体) 在适当分离距离 (大于 1″) 的光谱。图 9 展示了 MIRI 仪器对直接成像行星的观测能力，纵坐标是归一化的点扩散函数 (PSF) 到峰值信号的距离，黑色曲线是 MIRI 观测模拟图像的结果。圆点表示当前直接成像行星，颜色表示行星的表面温度。在黑色曲线之上的目标表示在它们与主星的角距离上，恒星的 PSF 对信号的贡献比行星的贡献少得多，因此这 4 个目标不需要使用星冕仪观测。Malin 等人[44]的模拟工作表明，对于这一类行星，MIRI 对发射光谱探测的信噪比对恒星光谱类型并不敏感。而行星温度在 750 K~1 750 K 之间时，分子探测将获得最高信噪比值。对于大部分温度低于 1 500 K 的行星，MIRI 有能力通过分子映射的方法探测到 H_2O、CO、NH_3、CH_4、HCN、PH_3、CO_2 等分子。重要的直接成像行星 (或亚恒星) 参数在表 3 中列出[43]，目前由直接成像方法探测到的行星都在此高信噪比分子探测所指示的温度区间范围内。

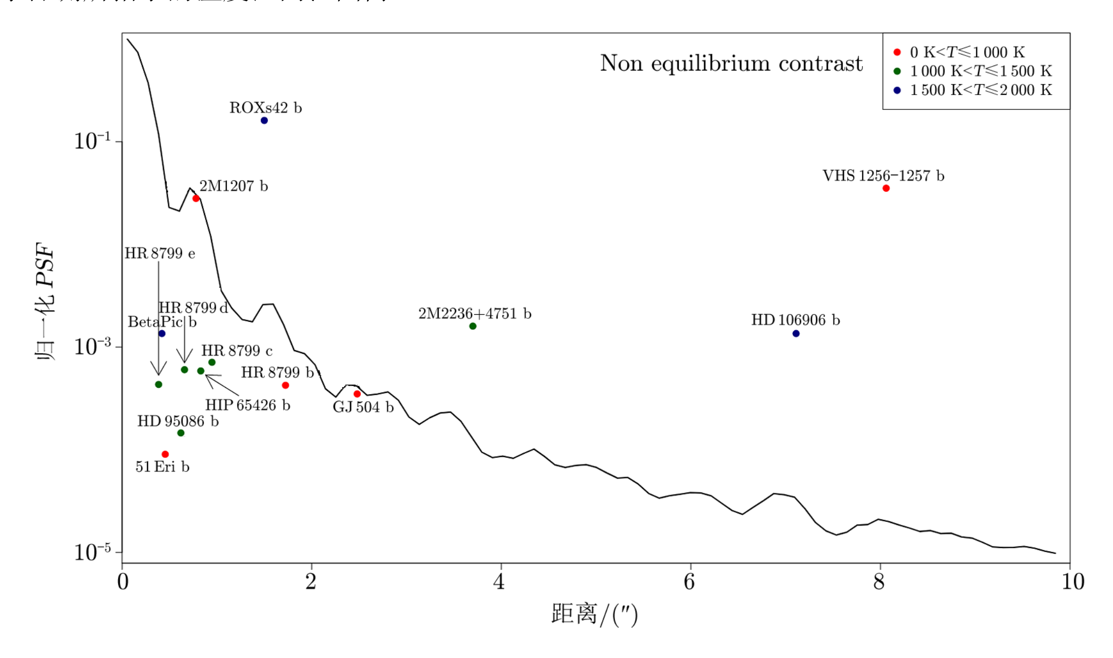


图 9　JWST 的 MIRI 仪器对直接成像行星的观测能力[43]

表 3 部分 JWST 直接成像观测行星的参数[43]

行星	$T_{\rm P}$/K	$R_{\rm P}/R_{\rm J}$	$\lg g/{\rm m\cdot s^2}$	θ	$C^{\rm neq}_{\rm FC3}$/mag	$T_{\rm eff}$/K	d/pc	OBS
2M1207 b	1 000	1.5	2	0.78″	3.88	2 500	52.4	C, S
2M2236+4751 b	1 050*	1†	2.5†	3.7″	6.87	4 000†	63	S
51 Eri b	700	1.	1.5	0.45″	10.07	7 400	29.4	C
β Pictoris b	1 700	1.65	1	0.42″	7.23	8 000	19.3	C
GJ 504 b	544	0.96	1.9	2.48′*	8.83	6 234	17.56	C, S
HD 106906 b	1 950	1†	2†	7.11″	7.15	6 516	92	S
HD 95086 b	1 050*	1.3	1.3	0.6″	9.58	7 550	90.4	C
HIP 65426 b	1 300	1.5	2.5	0.83″	8.09	8 840	111.4	C
HR 8799 b	950	0.96	2.8	1.724 1″	8.19	7 430	39.4	C
HR 8799 c	1 150	1.07	3.4	0.948 1″	7.71	—	—	C
HR 8799 d	1 150	1.14	3.4	0.658 7″	7.88	—	—	C
HR 8799 e	1 200	1.06	3.2	0.385 5″	8.19	—	—	C
ROXs 42B b	1 975	2.5	1.6	1.5″	2.02	2 200	135	C, S
VHS 1256-1257 b	880	1†	2.24	8.06″	3.49	2 620	12.7	S

注：平衡温度为 $T_{\rm P}$，行星半径为 $R_{\rm P}$，表面重力为 $\lg g$，分离角距离为 θ，在 JWST F1550C 滤光片的恒星-行星对比度为 $C^{\rm neq}_{\rm FC3}$，主星有效温度为 $T_{\rm eff}$，系统距离为 d 及建议观测类型为 OBS：C 对应星冕仪、S 对应光谱。表中“†”表示估计值；“*”表示给定范围的平均值。

JWST 被广泛使用后，系外行星科学大气的研究将拓展到什么宽度和深度？首先，对于当前已经进行大气表征的行星 (受强烈辐射的热巨星和直接成像的宽轨巨行星)，大气的表征将进入更长光谱波段、更多光谱特征、更细致的谱线描述以及对时变信号捕获的程度；大气结构的描述将更全面，大气化学成分的丰度与元素丰度的限制将更精准，这将助力进一步理解巨行星的形成过程。其次，对于体积较小、光谱信号更弱的超级地球和类海王星，或许在更长的波长上能够找到大气成分的更明确特征或云的特征，从而打破无特征光谱中的无大气假设与多云假设的简并。虽然对类地行星生命信号的探测仍然是一个遥远的目标，但目前已经史无前例地接近对超级地球和亚海王星挥发性大气中硅酸盐的观测[45]。太阳系外行星的广阔参数空间在 JWST 前真正打开。有了 JWST，天文学家将开始更深入研究所有行星大气或者说行星本身多样性的真正含义。

4 模型与理论挑战

在过去 20 年的研究中，描述系外行星大气的基本框架已经建立。特别是对热木星大气的特点有初步了解，在大气理论本身、大气 (光谱) 的自洽建模以及从观测光谱推断大气参数的反演方法三方面都有大量研究。JWST 仪器能力的提升带来高质量的数据，打开了新的探索空间，因此大气理论、模型与方法也需要改进。首当其冲的是与观测光谱关系最密切的反演方法。不透明度是联系光谱与大气参数的关键，它描述了光与物质相互作用的

过程。不透明度模型则模拟了这一过程作为物质特性的工具。目前先进的不透明度模型在解码 HST 等仪器拍摄的光谱时发挥了很好的效能。然而当数据以 JWST 的精度进入新的时代水平，不透明度模型的偏差可能会阻碍或误导我们捕捉到精妙的细节，如宜居性的线索。Niraula 等人[46]模拟了不透明度模型扰动对透射谱的影响，如图 10 所示，不同颜色的曲线代表不同的吸收截面模型 (扰动) 产生的透射光谱 (上) 及与标准模型生成透射光谱的偏差 (下)。其中 CS-DFLT 是研究中的标称截面，其余模型分别研究线参数测量不确定性 (CS-1SUP、CS-1SDN)，谱线展宽机制 (CS-SELF、CS-MAXB 和 CS-MINB)，线轮廓远翼机制 (CS-500W) 以及不同数据库 (CS-EXML：ExoMol 和 CS-HTMP：HITEMP2010) 的影响。研究结果表明，大气反演输出的敏感性与当前不透明度模型的局限性相结合，将导致在解释新一代系外行星光谱时出现 0.5 ~ 1 dex (即 3 ~ 10 倍) 的精度墙，比 JWST 第一阶段计划的目标精度低一个量级。

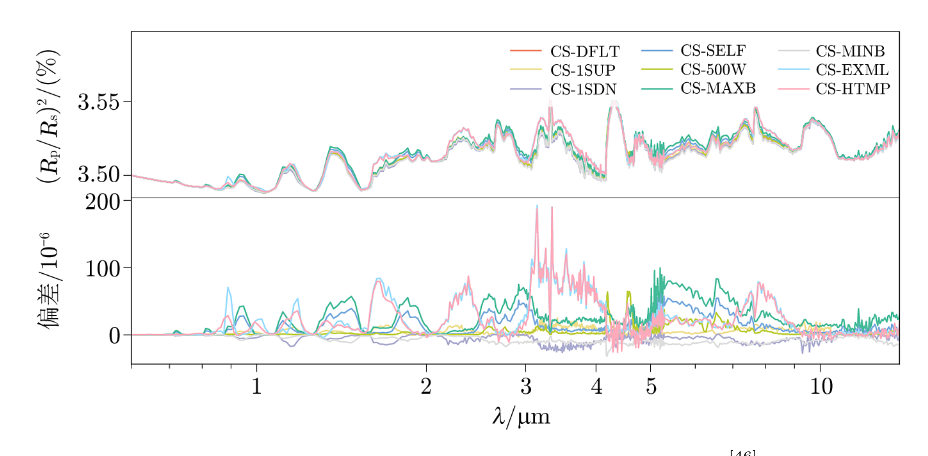


图 10 不透明度模型扰动传播到透射谱造成的偏差[46]

因此，在新的阶段工作中，需要仔细考虑不透明度模型中的误差来源 (线表、吸收截面、热力学数据等)，建立必要的关于偏离模型扰动的描述；这一过程也可以视为数据驱动物理模型从理论到实际工作的修正。在系外行星大气领域中被建模最成熟的热木星和超热木星，也需要加速重塑。(1) 从平衡到非平衡，大气中偏离平衡的过程需要纳入反演过程中进行。(2) 从一维进入到二维甚至三维的建模，此前关于透射光谱与发射光谱的自洽模型以及反演模型都是基于一维辐射对流传输模型，三维大气环流模型最初用来解释热木星的热相位曲线观测以及昼夜面的温差；但一维反演方法在平衡温度超过 1 400 K 时可能会导致对 (超) 热木星大气有偏差的参数估计，需要将三维大气环流的效应置入反演模型中进行修正[47]。(3) 从定常到时变：热木星大气中的热点偏移是大气动力学模拟对观测最成功的预言，模拟进一步指出热点的位置偏移是随时间而变化的。JWST 有机会捕捉到这种变化，亟需理论解释与描述这种偏移产生的机制。

就反演方法本身而言，参数化正向模型对真实情况描述的准确性与统计推断要求的简洁可计算性是一对矛盾体。在参数估计的过程中采取更高效的采样方法探索参数空间可能是一个解决的途径。目前最先进的代码使用广泛的参数估计方法，包括马尔可夫链蒙特卡洛

方法、最佳估计梯度下降算法和嵌套采样算法。用于大气反演的机器学习算法的潜力在未来有待发掘。

另外，当 JWST 面向更冷、更小的行星类型进行大气研究，此前对热木星的研究经验并不完全适用，太阳系中也未必能有对应的原型可以进行比较研究。大气理论需要根据行星类型进行调整。距离主星更远、更小的类海行星和超级地球大气预计会比热木星更加复杂。一方面它们受到的恒星辐射降低，表面重力加速度小，大气逃逸、光化学甚至与地表圈层相互作用等过程造成更显著的大气演化。对超级地球和亚海王星的次生大气与混合大气的研究受化学理论限制，未来 JWST 的数据有很大潜力通过对这类行星的 CO_2 与 CO 的丰度比对地幔氧逸度进行初步限制。因此未来的工作必须考虑光化学的过程并阐明大气逃逸的一般作用，实现超级地球和亚海王星样本的质量与氧逸度之间关系的量化[48]。另一方面，这些行星轨道参数空间可能使得大气过程变得更加复杂 (更普遍的轨道偏心率、自转轴倾斜度)，也为观测引入更多的不对称性与时变特征。

系外行星科学的宏大愿景是寻找太阳系外的另一颗地球，现阶段的驱动目标是描述类地行星系外行星大气的特征和寻找大气生物特征 (又称生命指纹)。JWST 能够大幅推进系外行星科学领域的发展，但在围绕类太阳恒星的类地系外行星上寻找到确定生命迹象是不现实的，现阶段的探测能力局限在太阳系近邻冷矮星周围的行星。关于 JWST 能否有效描述围绕冷矮星运行的潜在宜居类地行星的大气层仍然存在争议，主要面临的挑战是生命信号的有效性与观测时间的平衡。在这个问题上 TRAPPIST-1 系统中的 3 颗宜居带内行星 e、f、g 是重点的研究对象。对于目前常见的许多生物特征候选分子：O_2、CH_4，具有由非生物行星过程产生的潜在假阳性，解决的方法有两种：对这些信噪比稍高的分子进行相互之间丰度的限制，如 Krissansen-Totton 等人[49] 提出，大气中的 CH_4+CO_2−CO 不平衡可以作为未来的大气生物特征。模拟结果表明 JWST 可以对 TRAPPIST-1 e 的 10 次凌星事件观测进行有效的厌氧生物检测；模拟数据还显示可以检测到 CO_2，限制 CH_4 丰度从而排除非生物的源，并且对 TRAPPIST-1 e 行星大气中 CO 给出一个粗略的上限。另一种方法是寻找假阳性可能性更低的分子，如甲基化的卤素 CH_3Br、CH_3Cl、CH_3I[50]。

JWST 的能力固然出众，但 JWST 时代中韦伯绝非一枝独秀。这一时期的研究优势还包括积累了前 20 年的观测数据以及同期高质量的地基望远镜数据。因此，为了最大程度开发出 JWST 的研究能力与现阶段资源，多仪器多来源的数据整合研究值得引起重视。结合多星历、多波长、多望远镜凌星数据拟合，改进行星历表与凌食深度的精度，甚至进行进一步的恒星可变性或行星大气时变研究[51]。未来的 PLATO 任务对恒星年龄的精确测定与 JWST 的大气化学测量相结合，可以提高对行星演化过程的理解[52]。因此，对于个体行星或系统的多仪器多来源数据整合能够最大化 JWST 时代的观测资源，促进行星结构的精细刻画研究。

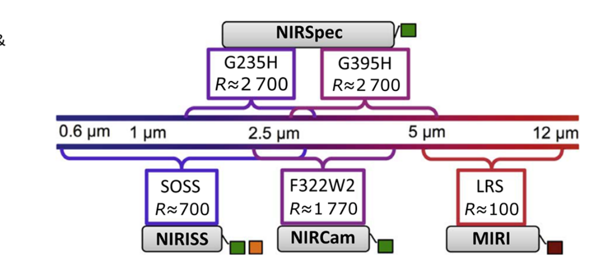
5 科学产出

目前 JWST 已经完成了早期任务与第一轮部分观测，第二轮的观测计划也刚完成审查

并公布。最早释放的观测数据是使用 NIRISS 的 SOSS 模式得到的 WASP-96b 大气透射光谱 (PID:2734)。该观测计划是 JWST 调试计划的一部分，目的是向公众展示 JWST 在红外波段前所未有的探测能力。包括 WASP-96 b 大气透射光谱在内的 6 组图片在几天内产生了 26 000 篇新闻文章和 1 200 亿次展示，成为有史以来最大的公共科学事件之一[53]。但在这一次简单的 6.4 h 的观测中，JWST 也更新了过往人们对 WASP-96 b 的认识。在更早的 HST/WFC3、Spitzer/IRAC 以及地面 VLT/FORS2、Magellan/IMACS 的观测中，从光学到近红外的透射光谱中存在没有被气溶胶模糊遮蔽的大气特征信号 (NaI)，反演分析结果支持指向这颗行星大气中无云的结论[54]。但 JWST 在 0.6 ~ 2.8 μm 波段的观测中清晰但并不如预期强烈的 H_2O 信号预示着云的存在。Samra 等人[55]结合 3D GCM 大气模拟与混合物质云粒子的动力学非平衡形成模型，说明由金属氧化物和硅酸盐成分混合而成的矿物云粒子可以解释 WASP-96 b 大气中云的存在如何与当前光谱呈现的特征相匹配。

更具备科学价值的是两个大型早期科学 (ERS) 项目：(1) JWST 系外行星凌星科学观测计划 (ERS-TRANS，ERS PID 1366)；(2) JWST 系外行星系统直接成像和光谱学早期发布科学计划 (ERS PID1386)。

ERS-TRANS 关注包括凌星、次掩和相位曲线观测的系外行星凌星科学[34]，该项目计划使用三种系外行星表征模式 (见图 11)：(1) 使用所有三种近红外仪器的四种独立模式对 WASP-39 b① 进行具有重叠波长覆盖的凌星观测；(2) 使用 MIRI/LRS 对 WASP-43 b 进行单相曲线观测；(3) 使用 NIRISS/SOSS 对具有明亮主星的 WASP-18 b 进行次掩观测。



注：右侧显示了将使用的仪器模式的波长覆盖范围，左侧文本上的颜色编码对应于右侧的仪器模式标签。

图 11　JWST 早期凌星科学的三个观测计划摘要[34]

WASP-39 b 的物理参数为：质量 $M_{\rm p} = 0.28\,M_{\rm Jup}$，半径 $R_{\rm p} = 1.27\,R_{\rm Jup}$，平衡温度 $T_{\rm eq} \approx 1\,100$ K，以 4.055 d 的周期围绕 G 型恒星运动。在 JWST 之前，天文学家对 WASP-39 b 的大气成分只探测到 Na、K 和 H_2O。而 JWST 甫一上任，就探测到了 WASP-39 b 大气中此前没能被探测到的 CO_2 和 SO_2。CO_2 信号在近红外波段的四个观测模式下呈现出很高的一致性 (NIRSpec PRISM[53]、NIRSpec G395H[56]、NIRISS[57]、NIRCam[58])。而 SO_2 在 4.05 μm 特征信号作为首个系外行星大气中光化学过程的证据引起了天文学家的重视。PID 2783 提出在第一轮观测的机动时间 (DDT) 中使用 MIRI 的 LRS 对 WASP-39 b 进行

①最初计划的观测目标为 WASP-79 b，后调整为 WASP-39 b。

后随观测，跟进对这一行星大气的 SO_2 检测，从而进一步研究其大气中的化学过程。通过使用 MIRI 低分辨率光谱仪观测 WASP-39 b 凌星，将可以直接检测到 7.5 μm 的 SO_2 特征，预计其振幅是 4.05 μm 特征的 3 倍。DDT 通过的 MIRI 后随探测将明确确认 WASP-39 b 大气中 SO_2 的存在，对大气金属含量进行严格限制，并有力地证实活跃的光化学过程正在系外行星大气中发生。这一探测还将对系外行星的硫存量和整体金属含量施加前所未有的限制，进一步限定大气成分与系外行星形成历史的关系。除了对大气成分的探测，JWST 对此前 WASP-39 b 大气中云的情况也提供了新的信息。此前 HST 和 Spitzer 探测到 Na、K 线的线翼压力致宽对应相对无云的大气情况。但目前 JWST 的观测数据更倾向 WASP-39 b 的大气中有云的结论。导致结论差异的原因可能是过于简化的云模型没有捕捉到系外行星大气中混合凝结云的复杂性质。WASP-39 b 可观测高层大气中的云是不同硅酸盐和金属氧化物的混合物。仅使用恒定的粒子尺寸或单一物质的云粒子来解释光谱可能不足以捕捉 JWST 观测的全部复杂性[59]。

WASP-18 b 是一颗围绕 F6V 型恒星运动，轨道周期只有 0.94 d 的超热木星，其质量 $M_{\rm p} = (10.4 \pm 0.4)\, M_{\rm Jup}$ 。ERS-TRANS 选择这一目标测试 JWST 的 NIRSS/SOSS 模式观测亮星周围系外行星大气的能力[60]。观测结果表明，对于 WASP-18 b 这类具有较高凌食信噪比的行星，可以通过对其大气层进行三维测绘，从而反演日面的温度结构以及分子丰度等属性的变化[61]。JWST 将能够对大多数明亮的凌星系外行星的上述物理特性进行测量，从而有可能直接从次掩观测中研究各种系外行星的动力学和化学特性。

WASP-43 b 的 MIRI/LRS 成功观测并证明了 JWST 在测量系外行星的热相位曲线的能力[62]。在超过 24 h 的时间跨度中，测光精度在光子极限的 25% 以内。光变曲线中存在一些仪器系统学斜坡效应，在 10.6 ~ 11.8 μm 波长范围内，斜坡的形状发生了剧烈的变化，这对应于检测器的“阴影”区域，目前需要进一步测试斜坡的系统学稳定性，以确定部分的相位曲线是否可行。

JWST 系外行星系统直接成像和光谱学早期发布科学计划 (ERS PID1386) 是唯一一个测试了 JWST 高对比度系外行星成像模式的 ERS 计划，该计划利用全部 4 个 JWST 仪器将直接成像行星 (或行星质量伴星) 的表征扩展到 15 μm 波段，并以前所未有的灵敏度在中红外成像星周盘。计划还将测试 JWST 在预计通常用于系外行星直接成像和光谱的关键模式下的性能，优化数据校准和处理，并生成代表性数据集，使广大用户群体能够有效地规划未来周期的一般观测计划 (GO)。计划观测内容包括：(1) 利用 NIRCam 和 MIRI 星冕仪对新发现的系外行星 HIP 65426 b 成像；(2) 利用 NIRISS 的进行孔径屏蔽干涉 (AMI) 观测 HIP 65426 系统；(3) 利用 NIRCam 和 MIRI 对环绕 HD 121569 A 的年轻碎片盘星冕成像；(4) 对一个宽轨道行星质量伴星 VHS 1256-1257 b 进行 NIRSpec/IFU 和 MIRI/MRS 光谱测量以及 NIRCam 成像。这一计划的成果展示了有史以来第一个用 JWST 直接拍摄的系外行星图像，以及第一个波长超过 5 μm 的系外行星图像。目前 ERS-1836 项目陆续发表了对 HIP 65426 b[63] 和褐矮星伴星 VHS 1256-1257 b[64] 的直接成像观测结果。通过对 HIP 65426 b 进行观测，人们获得了从近红外到中红外波段上的精确通量，从而对这颗行星的总发射能量或光度进行精确的限制；通过对 VHS 1256-1257 b 进行观测，人们探测到

CH_4、CO、CO_2、H_2O、K、Na，还发现了硅酸盐云的存在，这是第一次在行星质量伴星上发现这种物质。ERS-1836 项目的观测结果表明，JWST 的灵敏度比预期高至少 10 倍[65]，该项目后续还对第二轮的系外行星直接成像探测提供了详细指导[66]

Fu 等人[67](ERO-2734) 利用 NIRISS/SOSS 拍摄了膨胀巨星 HAT-P-18 b 透射光谱 $(0.6 \sim 2.8)$ μm，首次展示了这颗行星超过 1.6 μm 的红外光谱特征：He 的超量吸收与彗尾状结构。以前对 HAT-P-18 b 的地面观测没有看到尾部特征，因为这些观测的过量吸收信噪比较低。这一结果凸显了 JWST 在光度精度方面相比于典型的地面观测站的明显优势，虽然 JWST NIRSpec/G140H 的光谱分辨率 $(R \approx 2\,700)$ 低于地面高分辨率光谱仪 $(R > 10\,000)$，但凭借出色的稳定性和精度，这一仪器模式在进行 He 观测方面具有巨大的潜力。

第一轮观测中还将追踪高偏心率气巨星 HD 80606 b 大气中实时的 CH_4-CO 转化，并计算出其化学时标。此外，由突然加热和光化学作用力引发的硫成分表现出短期和长期循环，为探测系外行星上的硫开辟了一条有趣的途径。GO-2008 和 GO-2488 项目将使用 NIRSpec 和 MIRI 仪器得到 HD 80606 b 的时序光谱，以详细揭示这颗行星如何对近星周围的闪光热做出反应[68]。

未来 10 年在系外行星上探测生命的关键是研究围绕 M 型矮星的岩质行星是否拥有大气以及大气的演化过程。第一周期的观测中，JWST 展示了检测和表征地球大小的行星大气层的强大能力。在透射光谱方面，项目 (GO-1981) 证认了韦伯的第一颗系外行星 LHS 475 b (GJ-4102 b)[69]，这是一颗大小几乎与地球完全一样 $(R_\mathrm{p} = (0.99 \pm 0.05)\, R_\oplus)$ ，在其系统宜居带内的温暖 (586 K) 行星。此前 TESS 的观测暗示了这颗系外行星的存在。这个观测项目使用 JWST/NIRSpec 的 BOTS 模式在 $2.87 \sim 5.27$ μm 波段以 $R \approx 2\,700$ 分辨率进行 2.9 h 的观测，完成了独立证认并获取了 LHS 475 b 的透射光谱。无特征的透射光谱与一颗拥有高空云层 (类金星)、稀薄大气层 (类火星) 或根本没有明显大气层 (类水星) 的行星相符。目前的探测排除了 LHS 475 b 的大气是原始的 H 主导大气或无云纯甲烷大气的可能。同时还表明 JWST 具有一定的灵敏度来限制吸收特征小于 5×10^{-5} 的类地系外行星的次生大气层；因为当前的大气层限制说明了行星本身的性质，而不是仪器的限制[70, 71]。对于类地行星透射光谱中无特征光谱与高大气平均分子量大气、高空云覆盖大气的简并在 HST 和 Spitzer 的探测时代就已经存在。打破简并的有效手段是测量行星日面的温度。过去空间和地基对 TRAPPIST-1 系统类地行星的透射观测只能排除内侧 6 颗行星拥有无云的 H 主导包层大气的可能。Spitzer 尝试对 TRAPPIST-1 b 进行次掩探测，因为这是该系统最内侧最热的行星，理论上最容易探测到次掩信号，但 Spitzer 在 4.5 μm 处的测光未能探测到可信的次掩信号[72]。项目 GTO-1177 在更长的波段上利用 MIRI 以更高的测光精度成功探测到 TRAPPIST-1 b 的次掩，实现对系外类地行星日面发射的首次测量[73]。503 K 的日面温度明显高于根据主星辐射计算所得到的行星平衡温度，与被潮汐锁定的无大气行星日面温度模型 (508 K)[74] 基本一致。

6 展 望

本文主要介绍了 JWST 对系外行星大气研究的跨时代意义，包括 JWST 发射前系外行星大气领域的发展、JWST 在系外行星大气科学研究的仪器能力、先进探测能力与高质量数据带来的挑战与机遇，以及当前第一周期的科学产出。JWST 将在凌星科学 (包括透射光谱、次掩光谱和相位曲线) 和直接成像行星两个方面进行系外行星大气精细表征，实现对冷矮星周围宜居类地行星大气的初探。面对 JWST 的宽波段高信噪比数据，解释数据的模型需要在非平衡过程、多维热结构方面以及对大气风等动力学过程有更深入的理解。更高效的参数估计与机器学习算法将有助于数据反演时考虑更多细节的处理。关于大气生命信号与宜居性的研究需要与更多学科的联合，当前可以进行的是寻找更多种可以排除非生命过程的大气特征，以及对现有的大气生命信号做理论与实验的研究。目前 JWST 的第一周期科学成果正在陆续释放，本文重点介绍了凌星科学与直接成像行星的两大 ERS 项目。对 WASP-39 b 的多仪器观测模式光谱观测发现了显著的 CO_2 信号，还探测到首个光化学过程的产物——SO_2。直接成像行星项目也展现了 JWST 超出预期的灵敏度。我们还介绍了 JWST 证认的第一颗行星——LHS 475 b，以及这颗类地行星上大气存在的可能性。

最后，再次强调在 JWST 的时代，结合多星历、多波长、多望远镜凌星数据研究具有非常重要的意义。在 JWST 运行的 10 年里，还有一系列的空间望远镜与大口径地基仪器将投入运行，合力推动系外行星大气领域的发展 (见表 4 和图 12)。下面简要介绍这些仪器的探测能力与科学目标。

南希 • 格雷斯 • 罗曼空间望远镜 (Nancy Grace Roman Space Telescope)，原名宽视场红外巡天望远镜 (Wide Field Infrared Survey Telelescope, WFIRST)，是 NASA 计划于 2027 年前发射的红外空间望远镜，将对宇宙进行包括系外行星和暗能量等领域在内的广泛探索。WFIRST 的特点是拥有超大的视场 (有效面积达 0.281 平方度)，而其望远镜口径与哈勃空间望远镜相当 (2.4 m)，相当于 100 个 HST 同时工作，覆盖更大的天区。在系外行星大气领域，WFIRST 将通过直接成像法来发现和研究系外行星。WFIRST 的星冕仪仪器 (CGI) 将是第一个可以用于系外行星成像和光谱的星载星冕仪。CGI 的预计对比度接近 10^{-9}，比现有设施好 $2\sim3$ 个数量级，预计能够对热木星和冷木星进行直接成像和光谱分析，甚至有望拍摄 10 pc 以内的类太阳恒星周围的超级地球及类海王星的图像，为未来开展邻近宜居类地行星直接成像和表征奠定基础。

下一代地基超大口径望远镜包括 30 m 望远镜 (Thirty Meter Telescope, TMT)、极大望远镜 (Extremely Large Telescope, ELT) 和巨型麦哲伦望远镜 (Giant Magellan Telescope, GMT)，预计将在 2027 年或更晚的时候首次亮相。在自适应光学系统的帮助下，高对比度星冕成像仪可能会在 2035 年左右上线，这将有助于表征对比度为 10^{-8} 的温暖巨行星。

ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey) 项目[75]是欧洲航天局 (ESA) 的第四项中级任务，计划于 2029 年发射，将对约 1 000 颗系外行星的大气进行可见光和红外波长范围的普查。由于较小的集光面积，ARIEL 将主要关注温度高于

表 4　系外行星大气相关探测任务 (其中 HabEX 和 LUVOIR 为概念任务)

设施，望远镜口径	波段/μm	开始运行时间	主要目标/成果 (系外行星)	与 JWST 对比
HST，2.4 m	0.1~1.7	1990 年	主要通过凌星透射谱和凌星光变曲线表征系外行星大气的成分及逃逸。	具有紫外波段观测能力，研究密近行星的大气逃逸
JWST，6.5 m	0.6~28	2022 年	表征已知凌星行星与部分直接成像行星大气的成分、温度与结构成	—
Roman，2.4 m	0.5~2	2025 年左右	用微引力透镜搜寻系外行星，研究对直接成像行星	搭载拥有光谱能力的星冕仪
HabEx，4 m	0.115~1.8	2035 年 (建议)	对类太阳恒星宜居带的类地行星进行直接成像与光谱刻画；绘制出近邻行星系统的地图	10^{-10} 对比度成像
LUVOIR，A: 15 m, B: 8 m	0.1~2.5	2039 年 (建议)	研究潜在宜居行星上的宜居条件和生命迹象；表征数百颗凌星和直接成像的行星，通过比较行星学补充和完善行星大气过程理论	更大的望远镜口径、紫外波段能力与更高对比度的直接成像能力。
Ariel，1.1×0.73 m^2	0.5~7.8	2029 年	系外行星大气普查：侦查超过 1000 颗凌星行星，表征至少 500 个系外行星光谱	专用于系外行星大气，获取大量凌星行星光谱
TESS，4×0.1 m	0.6~1	2018 年	全天搜寻近邻亮星的系外行星	光学波段光变曲线
CHEOPS，0.32 m	0.4~1.1	2020 年	精确测定已知系外行星半径	光学波段光变曲线
PLATO，34×0.12 m	0.4~1.0	2027 年	重点搜寻类太阳恒星周围的温暖地球质量行星	光学波段光变曲线
Gaia，$2 \times (1.46 \times 0.5$ m$^2)$	0.3~1.0	2013 年	普查 200 ~ 500 pc 内的大质量行星	高精度天体测量与径向速度测量
目前地基望远镜, 3~10 m	VI-NIR	—	多用途天文台	通过高对比度成像和高光谱分辨率观测探测和表征系外行星
ELTs (ELT, GMT, TLT)	VI-MIR	2025 年左右	多用途天文台	更高对比度成像 (10^{-8})

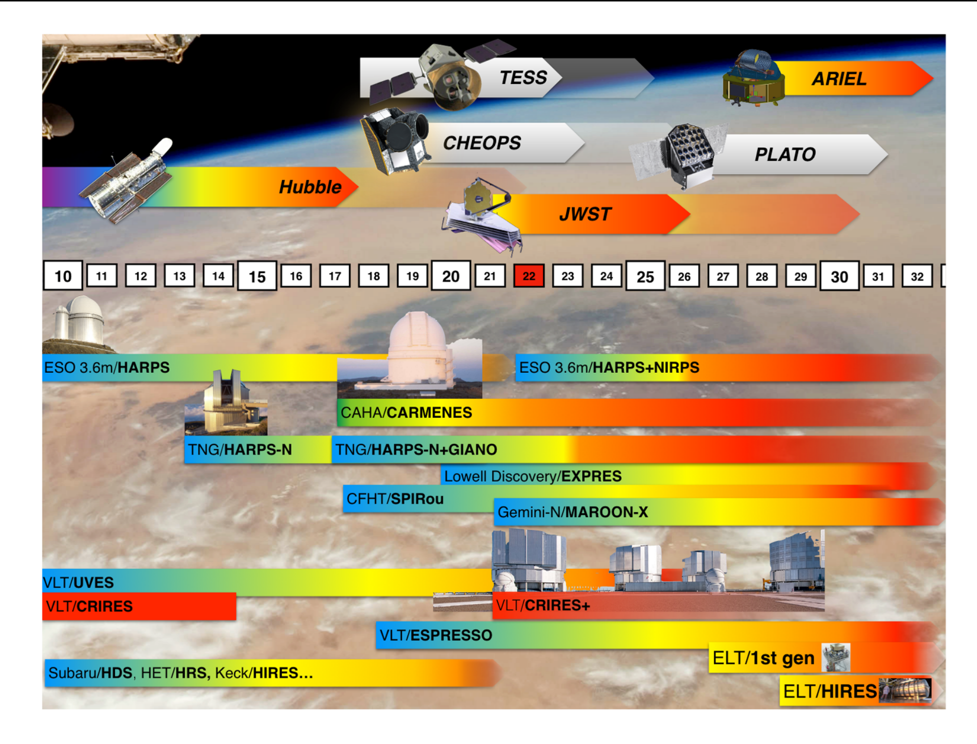


图 12 过去和未来 10 年可以进行大气表征的天基和地基望远镜/仪器[25]

500 K 的气态和岩石行星，可能无法研究 G、K 型恒星周围可居住的类地行星的大气层。ARIEL 项目的目标是测量系外行星的化学组成和热结构，从而揭示它们的形成和演化过程，以及与宿主恒星环境的关系。ARIEL 项目将为我们提供一个独特的机会，探索不同类型、大小和温度的系外行星大气，寻找生命可能存在或曾经存在的迹象。

在未来真正具备光谱能力的望远镜对准系外行星研究的终极目标——类太阳恒星周围的宜居带内类地行星前，有必要先对这些目标进行专门的普查探测以获得必要的行星物理参数进行大气可观测性的评估。欧空局 ESA 的 PLATO[76] (PLAnetary Transits and Oscillation of stars) 卫星致力于监测百万颗明亮恒星 ($4\sim11$ mag)，通过凌星光度测量到与地球大小类似的行星，再通过后随地面视向速度观测确定行星质量，最终将提供首个具有精确半径、质量、平均密度和年龄参数的大样本行星目录。中国科学家提出近邻宜居系外行星搜寻计划 CHES[77] (Closeby Habitable Exoplanet Survey) 将对太阳邻域约 100 颗 F、G、K 型恒星开展高精度定位测量，对可能存在的行星和位于宜居带的类地行星进行全面、精确的观测。天体测量方法有能力还原出宝贵的三维行星轨道运动信息，描绘行星更真实的物理状态。

在未来，罗曼空间望远镜的继任者，NASA 的下一代旗舰任务有望真正深入研究宜居类地行星的世界，对系外类太阳恒星宜居带中类地行星进行直接成像或更细致宜居性刻画。2016 年开始 NASA 开始考虑使用四个不同的太空望远镜，其中系外行星宜居空间天文台 (Habitable Exoplanet Observatory, HabEx)[78] 和大型紫外-光学-红外探测任务 (Large UV

Optical Infrared Surveyor, LUVOIR)[79]都有着眼与系外行星大气研究。前者是的主要目标是直接对地球大小的岩石系外行星进行成像，并表征其大气成分。通过测量这些行星的光谱，HabEx 将寻找宜居性的特征，例如水，以及潜在生命指纹气体；后者从紫外到红外的多波长能力可以检测诸多大气关键生物特征，进一步了解主星的紫外线辐射如何调节宜居行星大气光化学。2021 年，美国国家科学院发布题为《21 世纪 20 年代天文学和天体物理学的发现之路》的十年调查报告[80]，建议 NASA 考虑结合 LUVOIR 和 HabEx 设计元素的新型 6 m 口径望远镜。新望远镜将被称为宜居世界天文台 (Habitable Worlds Observatory, HWO)，初步启动日期定为 2040 年。在此之前，国内的天邻计划空间望远镜预期在 2035 年开始一个持续 10 年的观测计划，其主要任务是探测地外生命和系外可居行星[81]。天邻计划将采用 6 m 口径的单片主镜，在日地拉格朗日 L2 点的 Halo 轨道运行。天邻计划主要应用的技术包括星冕仪直接光谱和低到高光谱的凌星光谱，有望覆盖从紫外到近红外 ($0.25 \sim 2.5$ μm) 的波长范围。由于 JWST 没有紫外波段，而具有紫外能力的 HST 服役期将近，天邻计划的紫外波段能力将可能补充 HST 退役后对类太阳恒星周围系外行星高层大气观测研究的空白。

参考文献：

[1] Mayor M, Queloz D. Nature, 1995, 378: 355
[2] 马波, 余聪. 科学通报, 2020, 65: 3873
[3] Charbonneau D, Brown T M, Noyes R W, et al. ApJ, 2002, 568: 377
[4] Madhusudhan N. ARA&A, 2019, 57: 617
[5] Crossfield I J. PASP, 2015, 127: 941
[6] Birkby J L. Handbook of Exoplanets, Cham: Springer International Publishing, 2018: 1485
[7] Tinetti G, Vidal-Madjar A, Liang M C, et al. Nature, 2007, 448: 169
[8] Swain M R, Vasisht G, Tinetti G. Nature, 2008, 452: 329
[9] Sing D K, Désert J M, Des Etangs A L, et al. A&A, 2009, 505: 891
[10] Vidal-Madjar A, des Etangs A L, Désert J M, et al. Nature, 2003, 422: 143
[11] Werner M W, Roellig T L, Low F J, et al. ApJS, 2004, 154: 1
[12] Deming D, Harrington J, Seager S, et al. ApJ, 2006, 644: 560
[13] Knutson H A, Charbonneau D, Allen L E, et al. Nature, 2007, 447: 183
[14] Seager S, Deming D. ARA&A, 2010, 48: 631
[15] Chauvin G, Lagrange A M, Dumas C, et al. A&A, 2004, 425: L29
[16] Marois C, Macintosh B, Barman T, et al. Science, 2008, 322: 1348
[17] Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. Science, 2010, 327: 977
[18] Howell S B, Sobeck C, Haas M, et al. PASP, 2014, 126: 398
[19] Ricker G R, Winn J N, Vanderspek R, et al. JATIS, 2015, 1: 014003
[20] Broeg C, Fortier A, Ehrenreich D, et al. EPJConf, 2013, 47: 03005
[21] Von Essen C, Mallonn M, Hermansen S, et al. A&A, 2020, 637: A76
[22] Snellen I A G, de Kok R J, de Mooij E J W, et al. Nature, 2010, 465: 1049
[23] Crossfield I J M, Barman T, Hansen B M S. ApJ, 2011, 736: 132
[24] Esteves L J, de Mooij E J W, Jayawardhana R, et al. AJ, 2017, 153: 268
[25] Pluriel W. Remote Sensing, 2023, 15: 635
[26] Showman A P, Wordsworth R D, Merlis T M, et al. Comparative Climatology of Terrestrial Planets.

Mackwell S J, Simon-Miller A A, Harder J W, et al eds. Tucson: University of Arizona Press, 2013: 277
[27] Tan X Y, Komacek T D. ApJ, 2019, 886: 26
[28] Pierrehumbert R T, Hammond M. Annual Review of Fluid Mechanics, 2019, 51: 275
[29] Madhusudhan N. Handbook of Exoplanets. Cham: Springer International Publishing, 2018: 2153
[30] Barstow J K, Heng K. Space Sci Rev, 2020, 216: 82
[31] Madhusudhan N, Agúndez M, Moses J I, et al. Space Sci Rev, 2016, 205: 285
[32] Owen J E. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2019, 47: 67
[33] 闫冬冬, 郭建恒. 天文学进展, 2019, 37: 384
[34] Bean J L, Stevenson K B, Batalha N M, et al. PASP, 2018, 130: 114402
[35] Stevenson K B, Lewis N K, Bean J L, et al. PASP, 2016, 128: 094401
[36] Beichman C, Benneke B, Knutson H, et al. PASP, 2014, 126: 1134
[37] Fulton B J, Petigura E A, Howard A W, et al. AJ, 2017, 154: 109
[38] Zhu W, Dong S. ARA&A, 2021, 59: 291
[39] Owen J E, Wu Y. ApJ, 2013, 775: 105
[40] Ginzburg S, Schlichting H E, Sari R. ApJ, 2016, 825: 29
[41] Ginzburg S, Schlichting H E, Sari R. MNRAS, 2018, 476: 759
[42] Hinkley S, Carter A, Ray S, et al. Bulletin of the AAS, 2023, 55: 247.05
[43] Danielski C, Baudino J L, Lagage P O, et al. AJ, 2018, 156: 276
[44] Malin M, Boccaletti A, Charnay B, et al. A&A, 2023, 671: 24
[45] Zilinskas M, Miguel Y, van Buchem C P A, et al. A&A, 2023, 671: 13
[46] Niraula P, de Wit J, Gordon I E, et al. Nature Astronomy, 2022, 6: 1287
[47] Pluriel W, Leconte J, Parmentier V, et al. A&A, 2022, 658: A42
[48] Tian M, Heng K. https://arxiv.org/abs/2301.10217, arXiv:2301.10217, 2023
[49] Krissansen-Totton J, Arney G N, Catling D C, et al. Bulletin of the AAS, 2019, 51: 158
[50] Leung M, Schwieterman E, Parenteau N, et al. Bulletin of the AAS, 2023, 55: 125.02
[51] Hayes J J C, Priyadarshi A, Kerins E, et al. MNRAS, 2024, 527: 4936
[52] Müller S, Helled R. A&A, 2023, 669: A24
[53] Rustamkulov Z, Sing D K, Mukherjee S, et al. Nature, 2023, 614: 659
[54] McGruder C D, López-Morales M, Kirk J, et al. AJ, 2022, 164: 134
[55] Samra D, Helling Ch, Chubb K L, et al. A&A, 2023, 669: A142
[56] Alderson L, Wakeford H R, Alam M K, et al. Nature, 2023, 614: 664
[57] Feinstein A D, Radica M, Welbanks L, et al. Nature, 2023, 614: 670
[58] Ahrer E M, Stevenson K B, Mansfield M, et al. Nature, 2023, 614: 653
[59] Carone L, Lewis D A, Samra D, et al. https://arxiv.org/abs/2301.08492, arXiv:2301.08492, 2023
[60] Coulombe L P, Benneke B, Bean J, et al. Bulletin of the AAS, 2023, 55: 124.05
[61] Coulombe L P, Benneke B, Challener R, et al. Nature, 2023, 620: 292
[62] Bell T J, Kreidberg L, Kendrew S, et al. https://arxiv.org/abs/2301.06350, arXiv:2301.06350, 2023
[63] Carter A L, Hinkley S, Kammerer J, et al. ApJL, 2023, 951: L20
[64] Miles B E, Biller B A, Patapis P, et al. ApJL, 2023, 946: L6
[65] Hinkley S, Carter A L, Ray S, et al. PASP, 2022, 134: 095003
[66] Hinkley S, Biller B, Skemer A, et al. https://arxiv.org/abs/2301.07199, arXiv:2301.07199, 2023
[67] Fu G, Espinoza N, Sing D K, et al. ApJL, 2022, 940: L35
[68] Tsai S M, Steinrueck M, Parmentier V, et al. MNRAS, 2023, 520: 3867
[69] Lustig-Yaeger J, Fu G, May E M, et al. Nature Astronomy, 2023, 7: 1317
[70] Barclay T, Sheppard K B, Latouf N, et al. https://arxiv.org/abs/2301.10866, arXiv:2301.10866, 2023
[71] Zhou L, Ma B, Wang Y H, et al. RAA, 2023, 23: 025011
[72] Ducrot E, Gillon M, Delrez L, et al. A&A, 2020, 640: A112
[73] Greene T P, Bell T J, Ducrot E, et al. Nature, 2023, 618: 39
[74] Koll, D D B. ApJ, 2022, 924: 134

[75] Tinetti G, Eccleston P, Haswell C, et al. https://arxiv.org/abs/2104.04824, arXiv:2104.04824, 2021
[76] Rauer H, Catala C, Aerts C, et al. Experimental Astronomy, 2014, 38: 249
[77] Ji J H, Li H T, Zhang J B, et al. RAA, 2022, 22: 2003
[78] Gaudi B S, Seager S, Mennesson B, et al. https://arxiv.org/abs/2001.06683, arXiv:2001.06683, 2020
[79] The LUVOIR Team. https://arxiv.org/abs/1912.06219, arXiv:1912.06219, 2019
[80] NAtional Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s. Washington: The National Academies Press, 2021
[81] Wang W, Zhai M, Zhao G, et al. Advanced Optical Manufacturing Technologies and Applications 2022; and 2nd International Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing (AOMTA and YSAOM 2022). Changchun: SPIE, 2023: 137

Opportunities and Challenges in the Study of Exoplanetary Atmospheres during the JWST Era

CHEN Zi-xin[1,2], JI Jiang-hui[1,3]

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033, China)

Abstract: Currently, more than 5 000 exoplanets have been detected, and exoplanetary science is evolving from a focus on exoplanet detection to a focus on comprehensive exoplanetary characterization. Over the past 20 years, through the atmospheric characterization of about 100 exoplanets, a basic framework has been established for atmospheric detection methods, a series of atmospheric spectral forward modeling and retrieval methods, and atmospheric theory for transit and directly imaged planets. The James Webb Space Telescope (JWST) has unprecedented detection capabilities in the near to mid-infrared spectrum, and high-quality data will drive the development of atmospheric theory and models. The early released scientific results of the Cycle-1 have shown the ability of the JWST to characterize the atmospheres of transit and directly imaged exoplanets, as well as the initial constraints on the atmospheres of potentially habitable planets around nearby low-mass star. The pursuit of finely detailed exoplanet atmospheric characterization in the era of the JWST has already begun, and in conjunction with future missions with atmospheric survey capabilities, such as ARIEL and large-aperture adaptive-optics ground-base telescopes in the next 5 years, will reveal the diversity of exoplanet atmospheres at a much deeper level.

Key words: exoplanets; planetary atmosphere; space-base observation; pectroscopic observation